

IB 552 - 78 / 19

Ein Überblick über
Charge Transfer Devices (CTD's),
CTD-Kameras

F. Mettin

Freigabe: Die Bearbeiter:
Mettin, Florian

Unterschriften:

F. Mettin

Der Abteilungsleiter:
Dr. G. Hirzinger
Der stellv. Institutsdirektor:
Dr. G. Hirzinger
Der Institutsdirektor:

G. Hirzinger

i. V. Hirzinger

Dieser Bericht enthält:

35 Blatt davon

20 Bilder

 Diagramme

Ort: Oberpfaffenhofen

Datum: 18.10.1978

Bearbeiter: Mettin

Zeichen: Mn

Inhalt

Seite

0.	Einleitung	3
1.	Technische Angaben zu Charge Transfer Devices .	4
2.	Eigenschaften von CTD-Detektoren	8
3.	Anwendung von CTD's	9
4.	Beurteilung von CTD-Kameras	11
5.	Stand der Technik	12
6.	Schlußbemerkung und Literaturhinweise	13
7.	Abbildungsverzeichnis	17

0. Einleitung

Optische Systeme zur Zielerkennung und Zielverfolgung werden seit vielen Jahren gebaut und angewendet. Sie arbeiten im sichtbaren oder infraroten Bereich.

Um befriedigende Ergebnisse zu erzielen, muß man eine Reihe von Faktoren in Kauf nehmen, die sich bei Flugkörpern nachteilig auswirken. Dazu zählen:

- hoher elektronischer und mechanischer Aufwand
- hoher Energieverbrauch (Versorgung und Kühlung)
- hohes Gewicht
- Störanfälligkeit bei hohen Beschleunigungsraten.

Es wurden große Anstrengungen von Seiten der Forschung und der Industrie unternommen, einen Weg zu finden, diese Nachteile zu beseitigen oder zumindest zu reduzieren. Eine Möglichkeit ist die Anwendung der modernen Halbleitertechnik. In diesem Fall spezielle Anordnungen, die optische Eindrücke erfassen und direkt in elektronisch auswertbare Signale umwandeln. Je nach technischem Aufbau und Art der Auswertung spricht man von CTD's (Charge Transfer Devices), CCD's (Charge Coupled Devices) oder CID's (Charge Injection Devices). (Fig. 1)

In diesem Bericht werden nacheinander die technischen Grundlagen, Auswerteverfahren und erste Erfahrungen über praktische Anwendung mitgeteilt.

Zur Zeit sind Systeme von 2 bis 3 Firmen in der Erprobung, die daraufhin untersucht werden sollen, ob sie schon jetzt oder in naher Zukunft für den Einbau in Flugkörper geeignet sind.

1. Technische Angaben zu Charge Transfer Devices

CTD's unterscheiden sich nach physikalischem Aufbau, der Art der Informationsaufnahme und -weitergabe sowie ihrer Zweckbestimmung bzw. ihrem Anwendungsbereich, wobei sich der zuletzt erwähnte Anwendungsbereich in unserem Fall auf den Einbau in Kameras beschränkt und die weiteren Einsatzmöglichkeiten als elektronischer Speicher oder Filter hier nicht berücksichtigt werden.

1.1. Bei der Umwandlung von Strahlungsenergie in ein elektrisches Signal bieten sich bei Halbleitern als Reflektormaterial 2 Möglichkeiten:

1.1.1. Photoemission

Elektronen werden durch die auftreffende Strahlungsenergie ($h\nu$) aus der Oberfläche des Halbleitermaterials herausgeschlagen. Eine entsprechend angeordnete Anode fängt diese Elektronen ein. Aus der Differenz zum vorherigen Zustand oder aus der Änderung läßt sich ein dem Lichteinfall proportionales elektrisches Signal ableiten.

1.1.2. Photoconduction

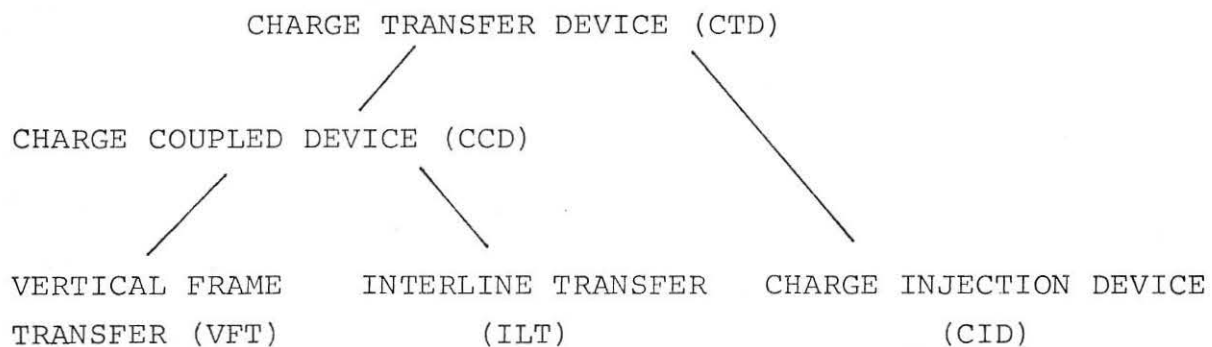
Die auf der Oberfläche des Halbleiters auftreffende Strahlungsenergie bewirkt, daß im Inneren des Halbleiters Elektronen freierwerden. Es entstehen die bekannten Löcher. Aus beidem resultiert eine höhere Leitfähigkeit, die bei angelegter Spannung einen höheren Strom zur Folge hat, der wieder dem einfallenden Licht proportional ist.

Bei Charge Transfer Devices (CTD) wird der aus den freiwerdenden Elektronen entstehende Elektronenfluß direkt als Ladungsänderung erfasst. Signalabgriff und Ladungsausgleich werden über mehrere Elektroden gesteuert.

CTD's bestehen überwiegend aus p- oder n- dotierten Silizium-

material, wobei Oxydschichten aus anderen Materialien Isolations- und Schutzfunktionen übernehmen.

1.2. Hinter dem Oberbegriff Charge-Transfer-Device verbergen sich zwei Gruppen, die sich durch die Auswertung der erzeugten Ladungsverschiebung unterscheiden (Fig. 2):



1.2.1. CCD

VFT und ILT unterscheiden sich nur in der Richtung, in der die Abfrage erfolgt. Beiden gemeinsam ist, daß die freigewordenen Elektronen in mehreren Schritten bzw. Stufen vom Aufnahmesektor bis zu einer Elektrode gebracht werden, die den Elektronenfluß abgreift. Inzwischen wird durch eine sinnvolle Steuerung der Gates (Gitter/Elektroden) der Aufnahmesektor in seinem Ausgangszustand zurückversetzt und somit wieder aufnahmebereit. Jenachdem, ob direkt oder nach einer Zwischenspeicherung ausgelesen werden soll, benötigt man mehr oder weniger Schritte (bzw. Potentialschwellen) innerhalb eines Taktes.

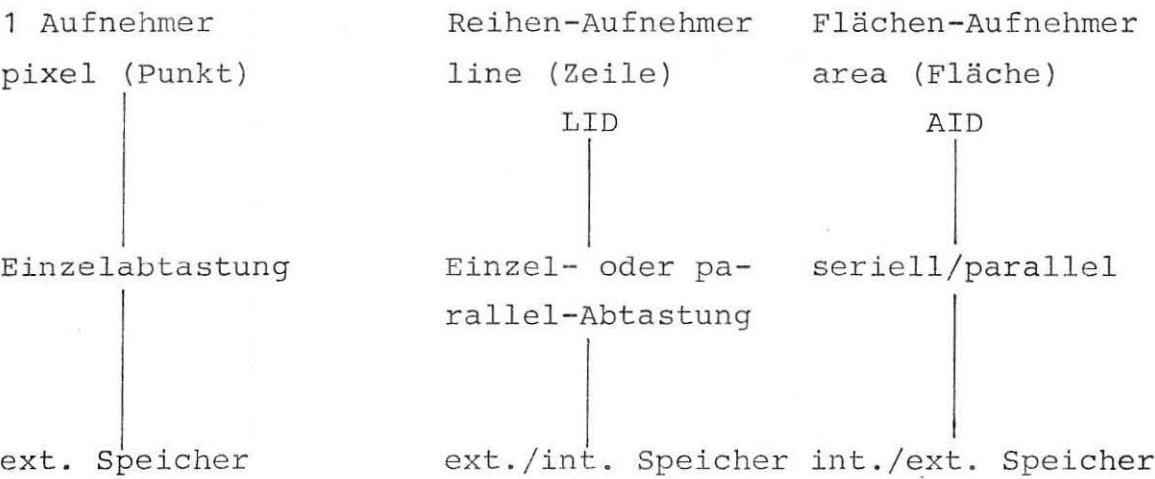
Entscheidend ist, daß die Signalauswertung über die abfließenden Elektronen erfolgt (destructive read out). Dieser Vorgang ist - recht einfach - in Fig. 3 dargestellt.

1.2.2. CID

Hier wandern die Elektronen innerhalb eines Taktes vom Aufnahmesektor bis in einen kapazitiven Speicher. An diesen Speicher

werden in einem x-y-Raster zwei Elektroden angelegt, die - wenn sie beide adressiert sind - die Ladungsänderung leistungslos abgreifen. Beim nächsten Schritt wird die Ladung entweder neutralisiert, oder bis zum nächsten Takt gespeichert. Somit kann während des nächsten Taktes ein Vergleich mit dem Elektronenfluß des vorigen Taktes Aufschluß über eine Änderung des Bildeindrucks geben (Integration). Die Elektronen fließen nicht nach außen, sondern werden innerhalb des Halbleiters rückgeführt. Man sagt: Non destructive read out. Die Taktzeiten liegen je nach Anforderungen bei 20-30 Hz. (Fig. 4).

1.3. Je nach Aufgabe und Ansprüchen sind bei CTD's verschiedene Anordnungen gebräuchlich:



Für den Einzelaufnehmer gibt es 2 Anwendungsbereiche.

- a) Einbau in eine herkömmliche Bildröhre (z.B. anstelle eines anderen Detektormaterials), was eine Erweiterung des zu erfassenden Wellenbereichs bedeutet, oder
- b) Einbau in ein elektromechanisches System, das durch Verschieben des Aufnehmers eine Fläche abtastet, wobei die Bildinformation z.B. in einem nachgeschalteten Speicher zusammengesetzt wird.

Bei Reihenaufnehmern, die nur aus wenigen Einzeldetektoren bestehen, ist parallele Abfrage einer ganzen Zeile möglich. Steigen die Ansprüche an Bildqualität bzw. Lesbarkeit, dann erhöht sich die Zahl der Bildpunkte so weit, daß nur noch serielle Abfrage möglich ist. Inzwischen gibt es Aufnehmer, bei denen der Speicher im Baustein integriert ist, dann kann die Bildinformation zunächst parallel gespeichert und u.U. verarbeitet werden, um anschließend seriell nach außen gegeben zu werden. Reihenaufnehmer haben z.Zt. zwischen 256 und 1728 Einzeldetektoren, damit ist eine parallele Ausgabe über ebensoviele Leitungen unmöglich. Zur Flächenabtastung benutzt man entweder die elektronische bzw. magnetische Strahlablenkung (Kamera) oder eine mechanische Verschiebung von Aufnehmer bzw. abzutastender Fläche.

Strahlablenkung oder mechanische Bewegungen entfallen, wenn man im Sinne eines möglichst klaren und einfachen Aufbaus einen Flächenaufnehmer verwendet. Flächenaufnehmer gibt es als CCD's und CID's, also einmal mit getrennt angeordneten Speichern - allerdings inzwischen innerhalb des gleichen Bausteins - und den einzelnen Detektoren direkt zugeordneten Speichern. Also:



Die Abfrage erfolgt punkt- oder zeilenweise im x-y-Raster. Die weitere Verarbeitung geschieht wie beim Reihendetektor: serielle Ausgabe der gespeicherten Bildwerte zur weiteren Verarbeitung. Wünscht man eine Darstellung auf dem Bildschirm, kann das Analogsignal verwendet werden. Für Bildvergleich und Bildauswertung wird das Signal digitalisiert und u.U. wieder in einen Speicher gebracht, der in seinem flächigen Aufbau dem

des Sensors entspricht (CCD-Speicher). Flächen-Aufnehmer gibt es in quadratischer und rechteckiger Form angefangen mit 30 x 30 über 100 x 100 bis 400 x 400 oder 100 x 160 über 190 x 244, 250 x 400, 360 x 480, 320 x 512 bis z.Zt. max. 500 x 800 Einzeldetektoren. Selbstverständlich gibt es noch weitere Kombinationen. Aufnehmer bis 200 x 250 passen auf einen üblichen 18 bzw. 24-poligen IC-Baustein (Fig. 13), wobei die Signalaufbereitung im IC so weit gehen kann, daß man direkt ein genormtes Fernsehsignal erhält.

Bei größeren Detektorzahlen gibt es eigene Aufnahmebausteine, die den Gegebenheiten (z.B. Einbau in eine FS-Kamera) angepasst werden. Abmessungen: einige mm bis zu 4 cm².

2. Eigenschaften von CTD-Detektoren

Für die Beschreibung und Beurteilung der Eigenschaften von CTD's gibt es eine Reihe von Kenngrößen, von denen hier die wichtigsten angeführt werden:

Detektoranzahl pro Reihe oder Fläche.

Detektorabstand (bei CCD's gering, da Speicher "außerhalb" angeordnet; bei CID's gleich Detektorfläche, wegen abwechselnder Anordnung von Hell- und Dunkelfeldern).

Eine Anzahl von Größen, die den Wirkungsgrad des Detektors beschreiben. Sie sind teilweise aus der Technik der Aufnahmeröhren übernommen oder im Laufe der Entwicklung vor CTD's neu geprägt worden, so daß es bisher keine treffenden deutschen Übersetzungen gibt.

MTF Modulation Transfer Function

CTE Charge Transfer Efficiency

PSF Point Spread Function

ISC Information Storage Capacity

Hinter diesen Ausdrücken verbergen sich sinngemäß folgende:

Ansprechvermögen, Auflösung, Empfindlichkeit, Effektivität, Dynamik, Speicher- und Integrationsmöglichkeit, Ansprechzeit bzw. Ansprechverzögerung (Temporal response), Überbelichtung, Nachleuchten und Übersprechen/Überblenden.

Dazu kommen: Linearität (Vergleich aller Einzeldetektoren), Reststrom (Dark-Current), Übersprechen zwischen Zeilen bzw. Spalten, Rauschen (Noise), Nyquist Rate (Verhältnis zwischen empfindlichen und unempfindlichen Teilen der Detektoroberfläche), Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts.

Zu 2 Punkten:

1. Bei CTD's gibt es viele Möglichkeiten, das Rauschen zu unterdrücken oder wirkungslos zu machen; z.B. durch entsprechende Beschaltung der CTD's (Fig. 5), durch Kühlung oder durch Mehrfachmessungen.
2. CTD's erfassen bei nahezu gleichem Wirkungsgrad ein breites Spektrum vom UV-Licht über den sichtbaren bis in den infraroten Bereich.

3. Anwendung von CTD's

CTD's sind letzten Endes steuerbare Halbleiter. Bringt man diese Detektoren mit der modernen Elektronik in Verbindung, ergeben sich innerhalb eines integrierten Bausteins Möglichkeiten, die CTD's eine Überlegenheit gegenüber den bisherigen Aufnahme- und Bildverarbeitungssystemen verschaffen. Am wichtigsten ist dabei die schon erwähnte Speicherfähigkeit der CTD's. Sie erlaubt es, Bildeindrücke aufzuintegrieren. Störungen zu unterdrücken, die Bildinformation zu korrigieren, Hintergrund auszublenden, die Empfindlichkeit den Umgebungsbedingungen anzupassen, Ziele hervorzuheben und zu selektieren, Bildvergleich mit vorgegebenen Mustern vorzunehmen, Fehler zu erkennen und auszuschalten und

- durch den Einsatz von Filtern - aus dem rasterförmig ermittelten optischen Eindruck ein einwandfreies Fernsehbild zu erzeugen.

CTD's wurden ursprünglich in herkömmliche - modifizierte - Kameras eingebaut und ersetzten somit lediglich den bisherigen Detektor. Inzwischen gibt es spezielle Konstruktionen, die der Aufgabe und dem gewünschten Ergebnis angepaßt sind.

Schon der Ersatz des bisher üblichen (Hg, Cd) Te-Detektors durch ein einzelnes oder Reihen-CTD-Element in der Aufnahme-
röhre verbessert deren Eigenschaften:

- breiteres Aufnahmespektrum
- etwa 10-fach höhere Empfindlichkeit (Fig.6)
- einfachere Signalverarbeitung
- höhere mechanische Belastbarkeit

um hier nur die wichtigsten Punkte anzuführen.

Für CTD-Flächendetektoren wurden dann eigene Systeme entwickelt, weil sich die Optik vereinfachte, die mechanische oder elektrische Bildablenkung vor dem Detektor entfallen konnte und weil wegen der elektronischen Rauschunterdrückung ein zusätzlicher Kühlkreis entfallen konnte.

Auf diese Weise konnte die Empfindlichkeit (Sensitivity) der Anordnung um das 10- bis 100-fache gesteigert werden. Der nächste Schritt bestand darin, die Kamera so weiter zu entwickeln, daß sie für extreme LLL (low light level)-Anwendung einsetzbar wurde. Zur Bildverstärkung (Image Intensifying) bieten sich drei Verfahren an.

a) Bildverstärkung durch Elektronenintensivierung bzw. -vielfachung durch mehrstufige Image-Intensifier wie bisher in Aufnahmeröhren üblich.

- b) Anbringen einer besonderen, Elektronen emittierenden Schicht vor dem eigentlichen CTD-Aufnehmer. Man erreicht so einen Verstärkungsfaktor von 2000 - 4000.
- c) Microchannel-plates, bei dem innerhalb eines Bündels von parallelen Lichtleitern eine Bildverstärkung stattfindet, die an den angeschlossenen CTD-Flächendetektor weitergegeben wird.

Besonders intensiv wird die Entwicklung zur Zeit im Fall b) betrieben, weil sich hier durch die Wahl der vorgeschalteten Schicht besonders viele spezielle Aufgaben lösen lassen:

- Bestimmung der Empfindlichkeit,
- Eingrenzung oder Erweiterung des ausgewerteten Wellenbereichs,
- Bestimmung der oberen und unteren Ansprechgrenze (Schutz vor Überbelichtung) und gewünschte oder ungewünschte Ansprechverzögerung.

Kameras, bei denen die Sichtschwelle mit diesen Methoden weit nach unten verschoben wurde, sind zur Zeit in Erprobung. Für astronomische Zwecke werden Kameras bzw. Sensoren gebaut, die in der Lage sind, einzelne Elektronen oder Photonen aufzufassen und zu registrieren.

4. Beurteilung von CTD-Kameras

Schaut man sich einen Vergleich zwischen herkömmlichen Kameraröhren und CCD-Detektoren aus dem Jahre 1976 an, so bleiben für den CCD-Aufnehmer wenig Vorteile übrig. Dazu zählen: breiter Wirkungsbereich, höhere mechanische Belastbarkeit, höheres Signal-Rausch-Verhältnis, geringes Rauschen über das gesamte System gesehen, kein Nachleuchten, kompakter Aufbau, hohe Lebensdauer, gleichbleibende elektrische Eigenschaften und niedrige Versorgungsspannungen. Demgegenüber spricht für die Röhre: höhere Auflösung, einheitliches Bild (CTD: Linear-

tätsschwankung von Einzeldetektor zu Einzeldetektor), hohe Datenrate über einen Signalausgang kaum Überstrahlen (Überblenden) größeres Bild und hohe Bildqualität (Fig. 7).

Legt man neueste Unterlagen zugrunde und verläßt man sich auf Aussagen von Leuten, die inzwischen mit CTD-Kameras arbeiten, muß man feststellen, daß die Entwicklung der letzten 2 Jahre die noch vorhandenen Nachteile minimalisiert oder beseitigt hat (Fernsehbilder von CTD-Kameras sehen heute auf dem Bildschirm genauso aus, wie die von Videoröhren). Damit kommen die unbestreitbaren Vorteile von CTD-Detektoren immer mehr zum Tragen.

Da der Wirkungsgrad der CTD's auch durch die Kameraoptik beeinflusst wird, ist man zur Zeit dabei, diese entsprechend anzupassen. Man erreicht so inzwischen Empfindlichkeiten, die herkömmliche Systeme um das 10 bis 100-fache übertreffen.

5. Stand der Technik

CTD-Kameras haben in den letzten Jahren eine intensive Entwicklung und Erprobung hinter sich gebracht.

Es gibt Kameras für verschiedene Spektralbereiche:

UV / sichtbar / IR. (IR s. Fig. 8)

Die Empfindlichkeit liegt z.Zt. bei LLL-Kameras um das 10 bis 100-fache höher.

CTD-Kameras liefern einwandfreie Fernsehbilder bzw. Daten für die elektronische Auswertung (Fig. 9). CTD-Kameras für den Einbau im Flugzeug und Flugkörper sind im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium mit dem Ziel, sie möglichst leicht, robust und energiesparend zu bauen. Grundsätzlich gilt: An der Weiterentwicklung von CTD-Systemen wird intensiv gearbeitet.

Im Forschungszentrum Oberpfaffenhofen sind z.Zt. 2 Systeme im Einsatz (1 x Fairchild, 1 x RCA, Fig. 10, 11 und 12), die nach Aussagen der Benutzer zufriedenstellend arbeiten. Über das Verhalten bei erschwerten Umgebungsbedingungen (Tem-

peratur, g-Belastung usw.) liegen hier keine Informationen oder Erfahrungsberichte vor.

6. Schlußbemerkung und Literaturhinweise

Dieser Bericht sollte nur einen zusammenfassenden Überblick über Technik und Anwendung von CTD's geben. Beim Verfasser ist inzwischen eine recht umfangreiche Literatursammlung entstanden, die von Zeit zu Zeit ergänzt werden soll. Eine Auswahl hierzu findet sich unter den hier angegebenen Themenkreisen, die jederzeit beim Verfasser zugänglich sind.

a) Grundlagen

Physics and Applications of CCD's (Fairchild)

Nonvolatile Semiconductor Memory, Devices (Proceedings of the IEEE 7/76)

Electronic Imaging for Space Science and Applications (Astronautics + Aeronautics 10/77)

Astronomical Applications of CID's (Low Light Level Devices (VOL 78; 1976)

Techniques for Evaluating CCD's (Optical Engineering 6/77)

CCD-Memory (Fairchild)

b) Darstellung / Vergleich: CTD / Bildröhre

Can Solid-State Imaging Devices Replace Camera Tubes
(Optical Engineering 6/77)

Direct Coupling of Five-Micrometer (Hg, Cd) Te Photo-
voltaic Detector and CCD-Multiplexer (Optical Engineering
6/77).

CCD-TV Cameras, Utilizing Interline-Transfer Area Image
Sensors (Fairchild)

Operation of CCD's in the Electron Bombarded Mode, EBS .
(Low light level Devices, Vol. 78; 1976)

Comparision of TV Imagers for use in low light level
Imaging by Electron Beam Scan VS. Solid State Readout.
(Low light level Devices, Vol. 78; 1976)

The Advantages of CCD's for Imaging at low light and
Contrast Levels. (Naval Air Development Center)

c) Infrarot - CCD

Application of Charge Coupled Devices to Infrared Detection and Imaging (Proceedings of the IEEE 1/75)

256-Element Schottky Barrier IR-CCD Line Sensor
(RCA-Laboratories)

d) Intensified CTD's / Low Light Level CTD's

Detecting Photoelectron Images with Semiconductor Arrays for Multichannel Photo Counting (Optical Engineering 6/77)

Intensified Charge Coupled Devices for Ultra Low Light Imaging (LLL-Devices, Vol.78; 1976)

A Large Imaging Array CCD Program (LLL-Devices, Vol.78; 1976)

Low Light Level Performance Analysis for Charge Coupled Device TV Cameras (LLL-Devices, Vol. 78; 1976)

Test Results on Intensified Charge Coupled Devices (LLL-Devices, Vol. 78; 1976)

e) Beschreibungen Kameras bzw. CTD's

Firmenunterlagen Fairchild

Firmenunterlagen RCA

f) Sonstiges

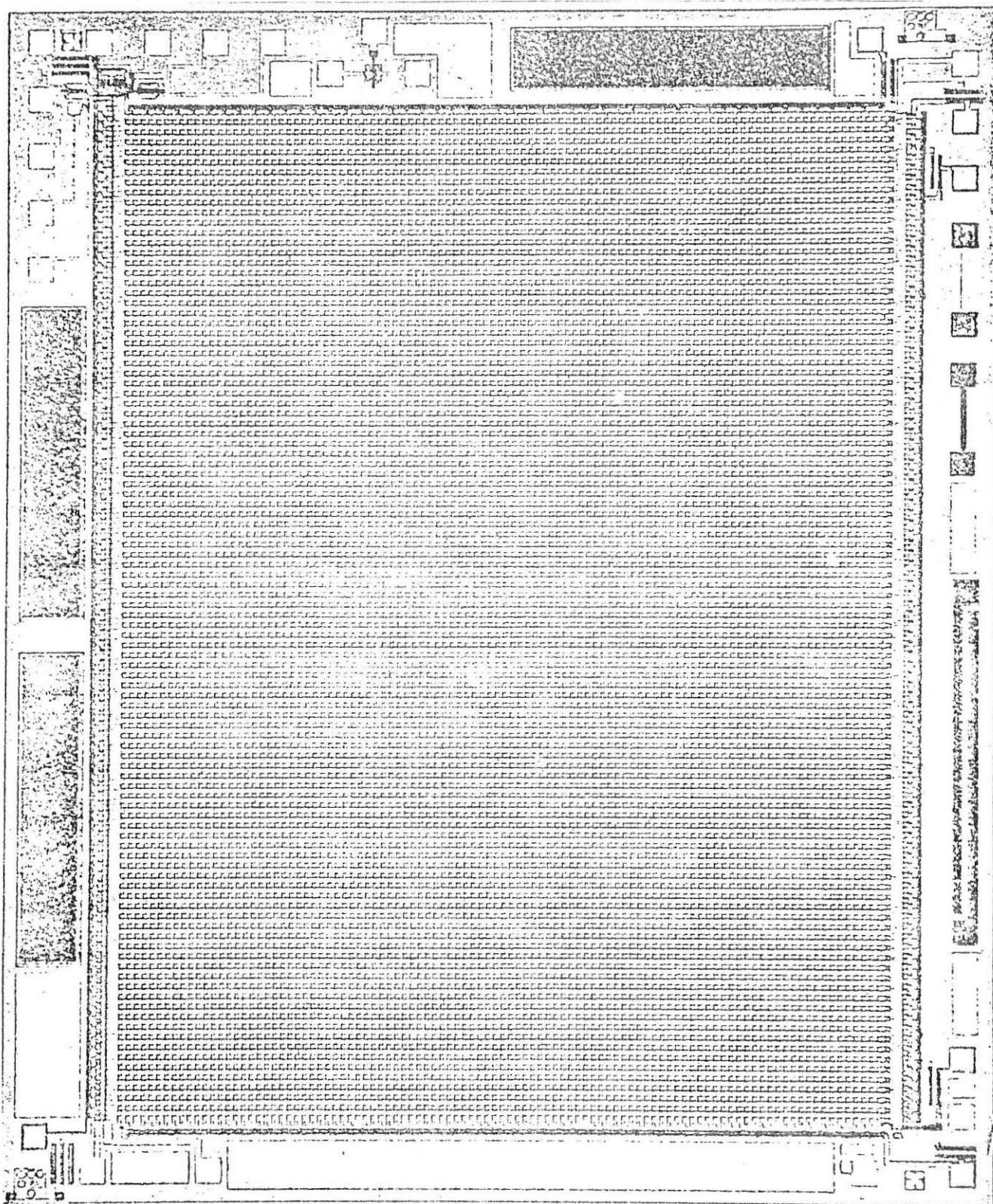
A Review and Projection of Semiconductor Components for
Digital Storage (Proceedings of the IEEE, 8/75)

Charge Coupled Devices for Analog Signal Processing
(Proceedings of the IEEE 5/76).

7. Abbildungsverzeichnis

Diese Abbildungen sind lediglich als Hinweis auf die vorhandene Literatur gedacht. Dort sind alle Darstellungen genauer beschrieben.

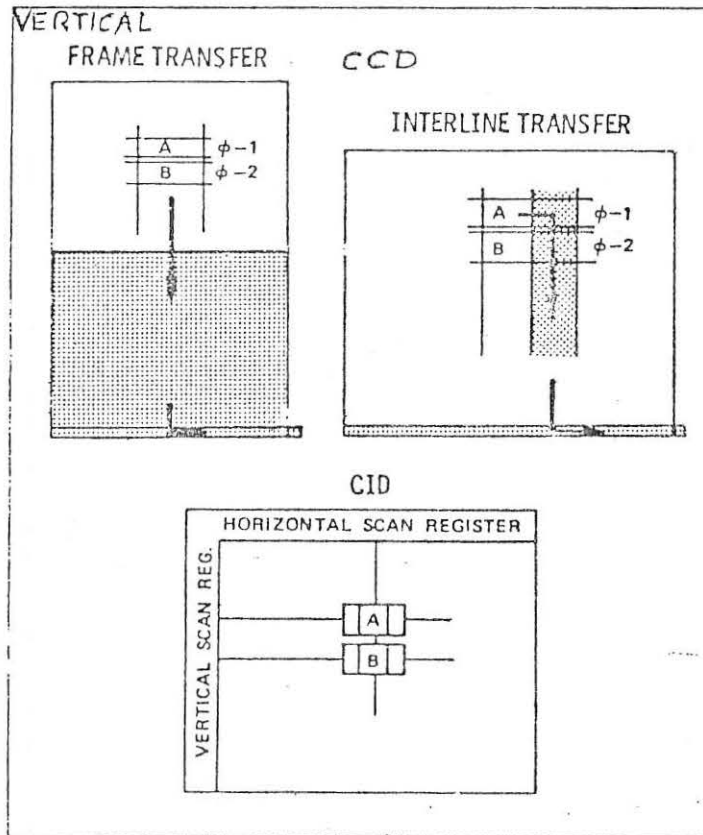
Fig. 1	CCD Array
2	CTD Strukturen
3 a	Ladungsverschiebung im CCD
3 b	Ladungsverschiebung im Halbleiter (CCD)
3 c	Informationsspeicherung im CCD
4 a	Auslesetechnik bei CID's
4 b	Zeitl. Ablauf des Auslesevorgangs bei CID's
4 c	Aufbau eines CID-Steuersystems
5	Schaltung zur Reduzierung des Rauschens
6	Wirkungsgrade von Bildröhren/CCD's
7	Vergleichstabelle Bildröhre/CCD
8 a	Aufbau eines IR-CCD
8 b	Auslegung eines IR-CCD
8 c	Indirektes Auffassen der Strahlung IR-CCD
8 d	Indirektes Auffassen der Strahlung über pyroel. Element
9	Schema eines digitalen Kamera-Systems
10	Fairchild CCD Line-Scan-Kamera
11	RCA CCD Array-Kamera
12	Block-Diagramm zur RCA-Kamera
13	CCD-Reihen- und Flächendetektoren



CHARGE-COUPLED IMAGE SENSOR shown in this color photomicrograph, made in the author's section of the Research and Development Laboratory of the Fairchild Camera and Instrument Corporation, consists of 10,000 photosensor elements arrayed in a rectangular 100-by-100 grid on a silicon chip measuring only .12 by .16 inch. (Large brown and white shapes around border are metal contacts for electrodes.) The device is designed to be used in an experimental television camera based on the concept of charge-cou-

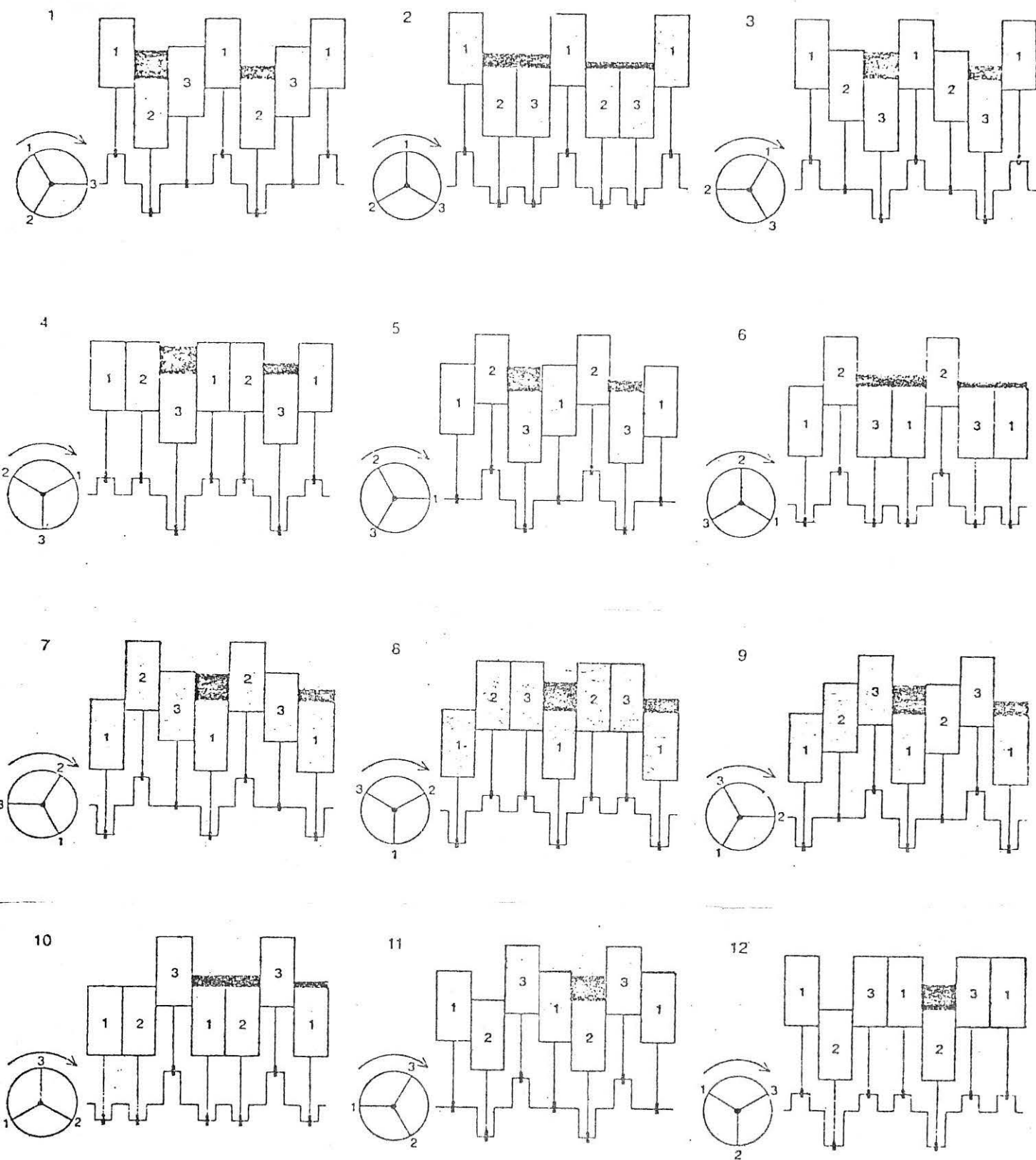
pling, that is, the collective transfer of all the mobile electric charge stored within a semiconductor storage element to a similar, adjacent storage element by the external manipulation of voltages. Although such charge-coupled image sensors are still in a somewhat primitive state, in the author's view they "clearly point the way toward a powerful camera technology."

Fig. 1 CCD-Array



CTD area array structures. Opaqued areas are shaded.

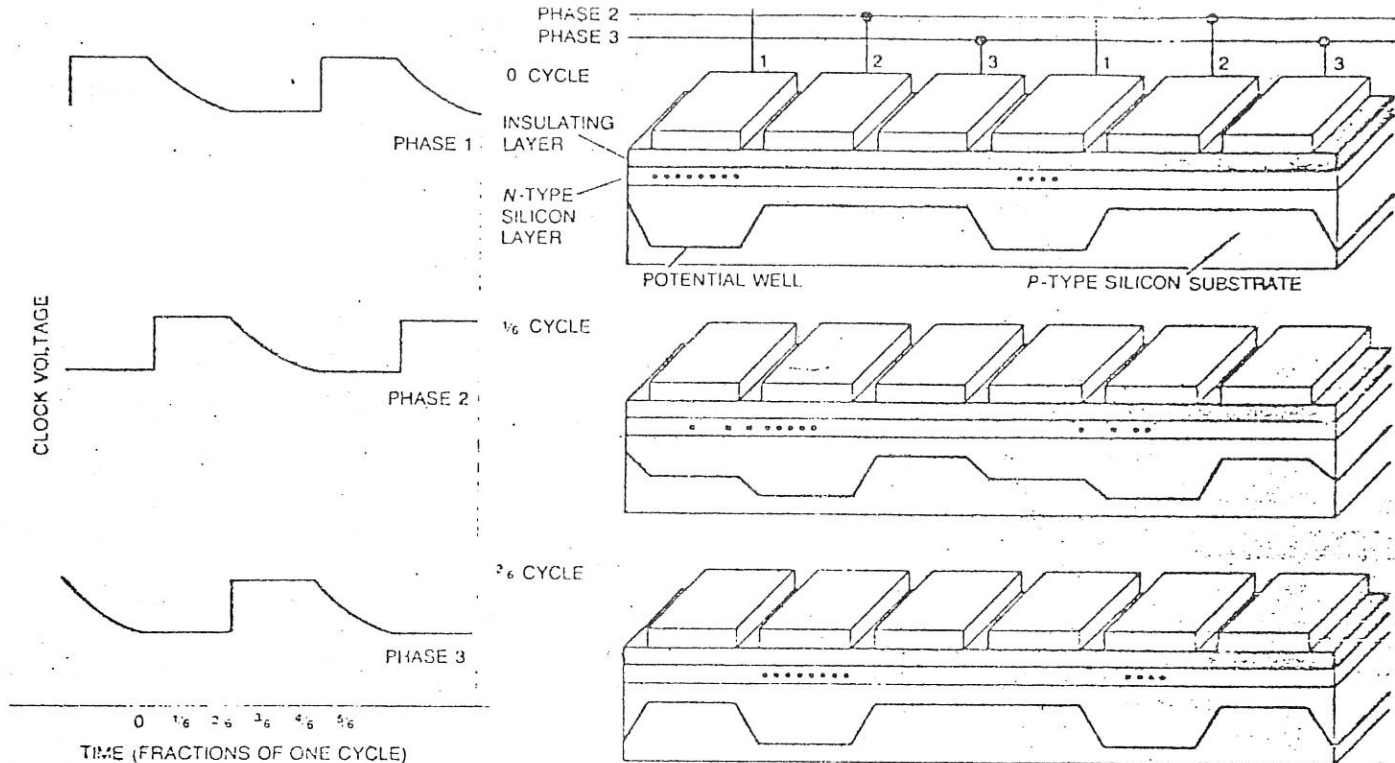
Fig. 2 CTD Strukturen



MECHANICAL ANALOGY useful in visualizing the operation of a charge-coupled device is depicted in this sequence of idealized drawings. The machine illustrated consists of a repeating series of three reciprocating pistons with a crankshaft and connecting rods to drive them. On top of one or more of the pistons is a fluid (color). Rotating the crankshaft in a clockwise manner, as shown

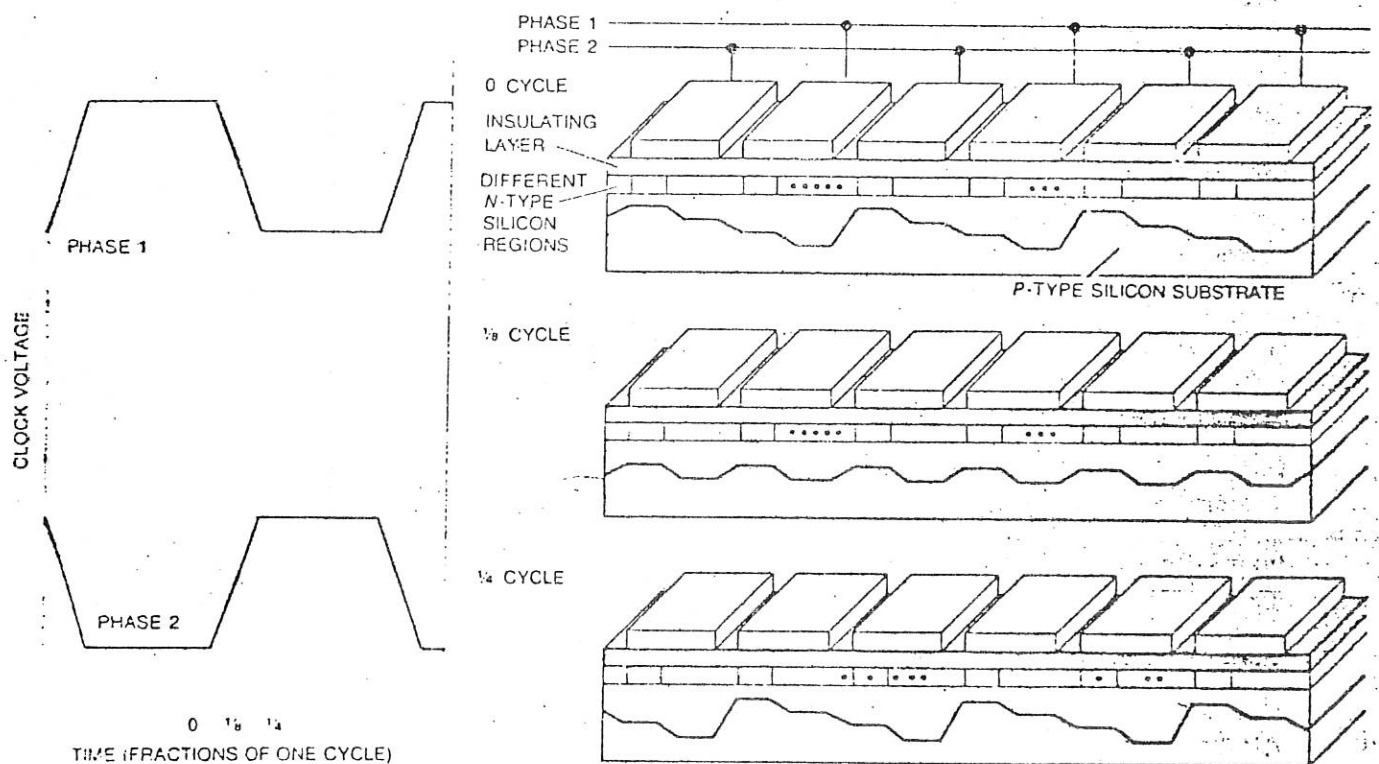
in this instance, causes the fluid to move to the right. If the crankshaft were to be rotated in a counterclockwise manner, on the other hand, the fluid would move to the left. This particular type of arrangement, which requires three pistons to repeat the pattern, is called a three-phase system. An analogous charge-coupled device can be fabricated of silicon.

Fig. 3 a Ladungsverschiebung im CCD



TWO THREE-PHASE CHARGE-COUPLED ELEMENTS are shown in the cross-sectional diagram at right; the curves at left give the relative timing of the "clock voltage" wave forms for three-phase operation. The device consists of a "p type" silicon substrate (in which electrons are normally the signal carriers) with a silicon dioxide insulating layer on its surface. Conducting electrodes are deposited on the surface of the insulator. Underlying the insulator and within the bulk of the semiconductor the electrical conductivity

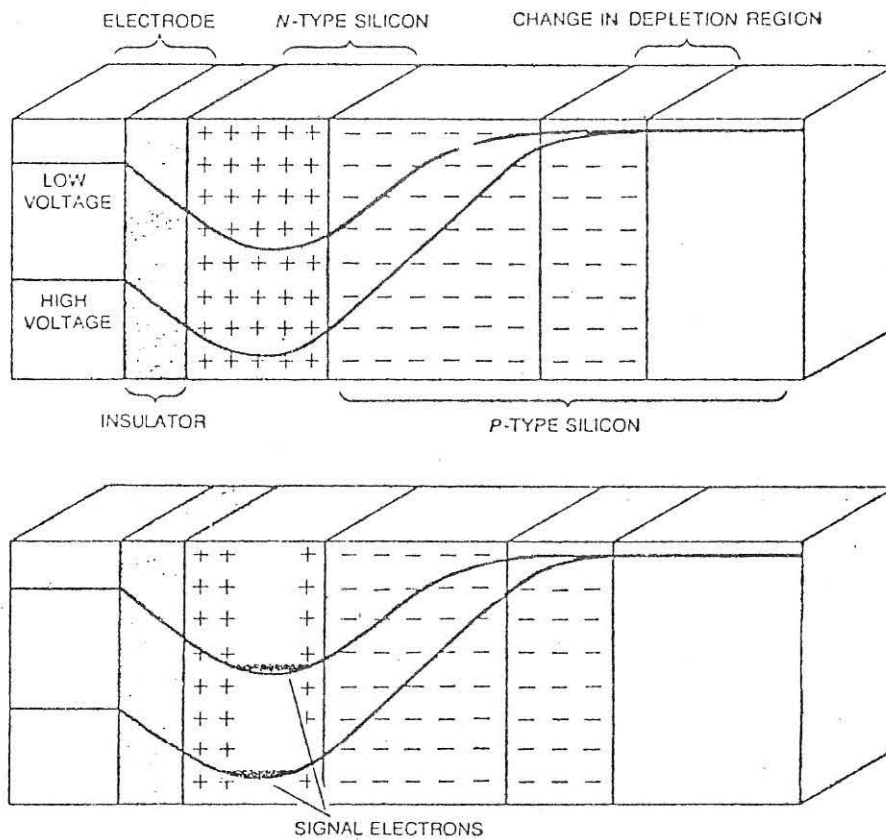
of the silicon can be altered to form an "n type" layer (in which electron "holes" are normally the signal carriers). When the clock voltage is applied to the electrodes, some of the electrons in the vicinity of each electrode will form a discrete packet of charge (black dots) and move one element to the right for each full clock cycle. In effect the packets of electron charge move to the right as a result of the continuous lateral displacement of the local "potential well" in which they find themselves (white contours in substrate).



THREE TWO-PHASE CHARGE-COUPLED ELEMENTS are shown in these cross-sectional diagrams; again the curves give the relative timing of the clock voltages, this time for two-phase operation. Here, the potential wells are given the required asymmetry by

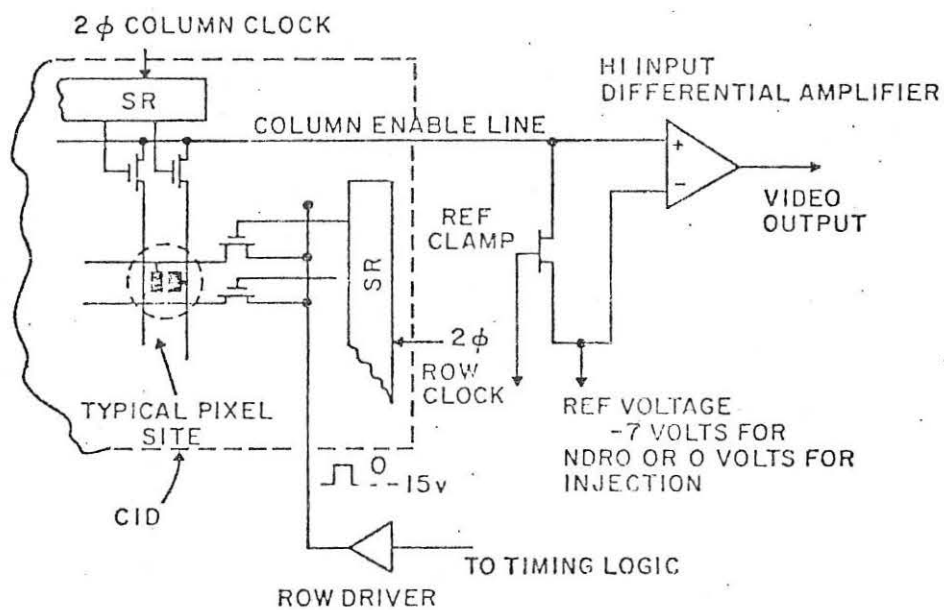
the introduction of different n-type conductivity regions just under the insulating layer. As in the illustration at the top, the external clock voltages on the electrodes cause the electrons to move in packets through the n-type semiconductor layer toward the right.

Fig. 3 b Ladungsverschiebung im Halbleiter (CCD)



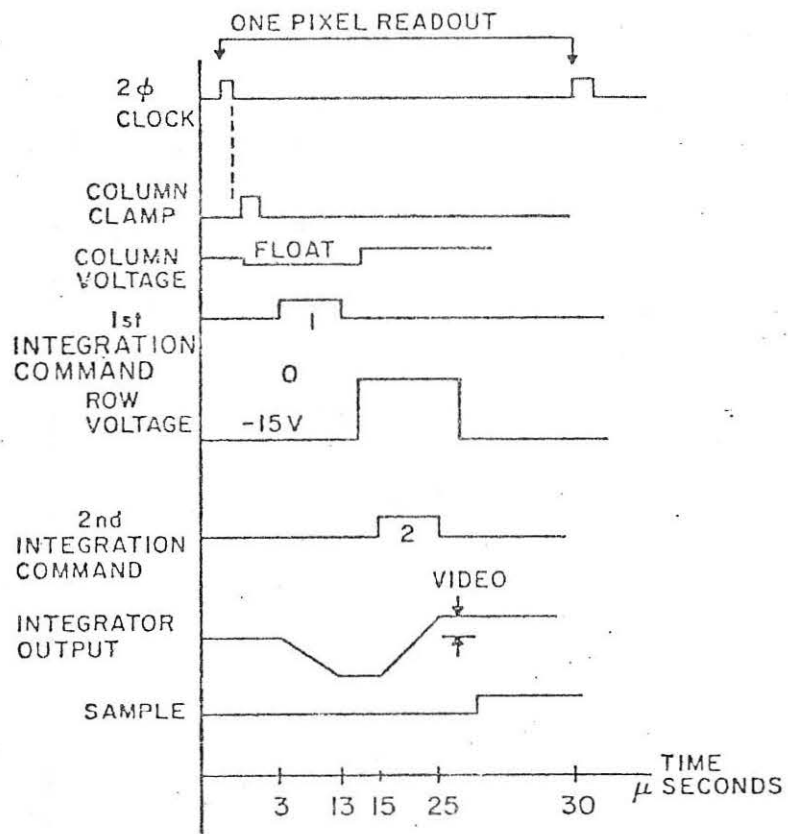
POTENTIAL-ENERGY PROFILES for a typical charge-coupled information-storage element are shown here as a function of distance into the bulk of the semiconductor at right angles to its surface. (In order to show the potential wells clearly, this diagram has been rotated by 90 degrees with respect to the preceding ones.) The charge-distribution patterns are shown for two situations: with no electrons in the well (*top*) and with some electrons in the well (*bottom*). As the curves indicate, the higher the clock voltage, the deeper the well.

Fig. 3 c Informationsspeicherung im CCD



CID readout technique for NDRO or injection.

Fig. 4 a Auslese-Technik bei CID's
(NDRO = Non Destructive Read Out)



CID pixel readout timing.

Fig. 4 b Zeitlicher Ablauf des Auslesevorgangs bei CID's

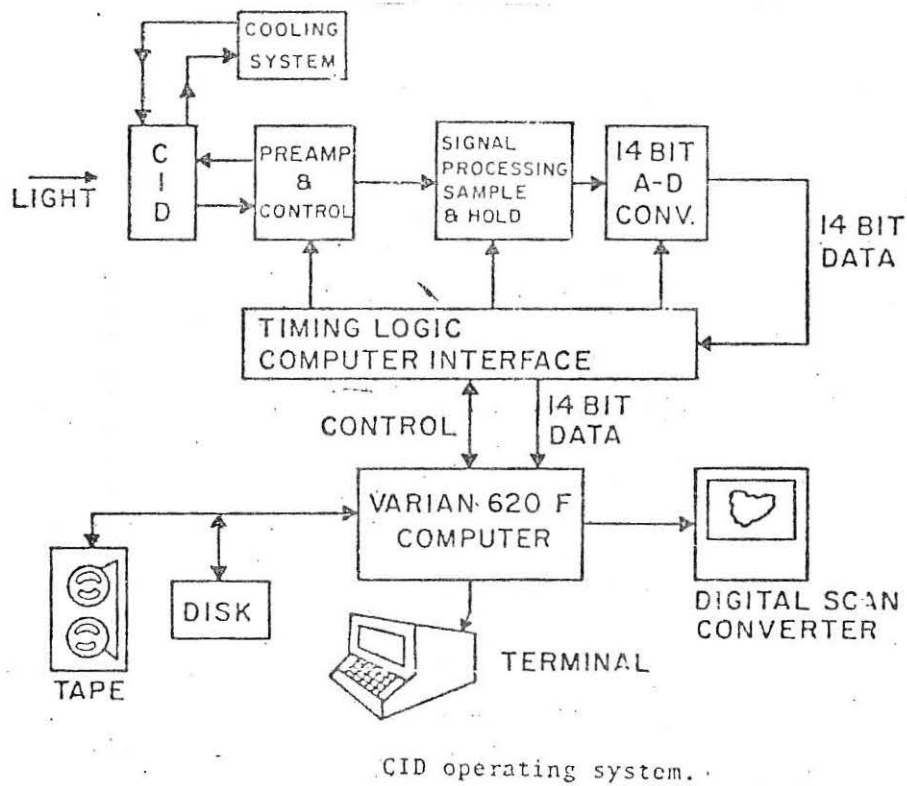
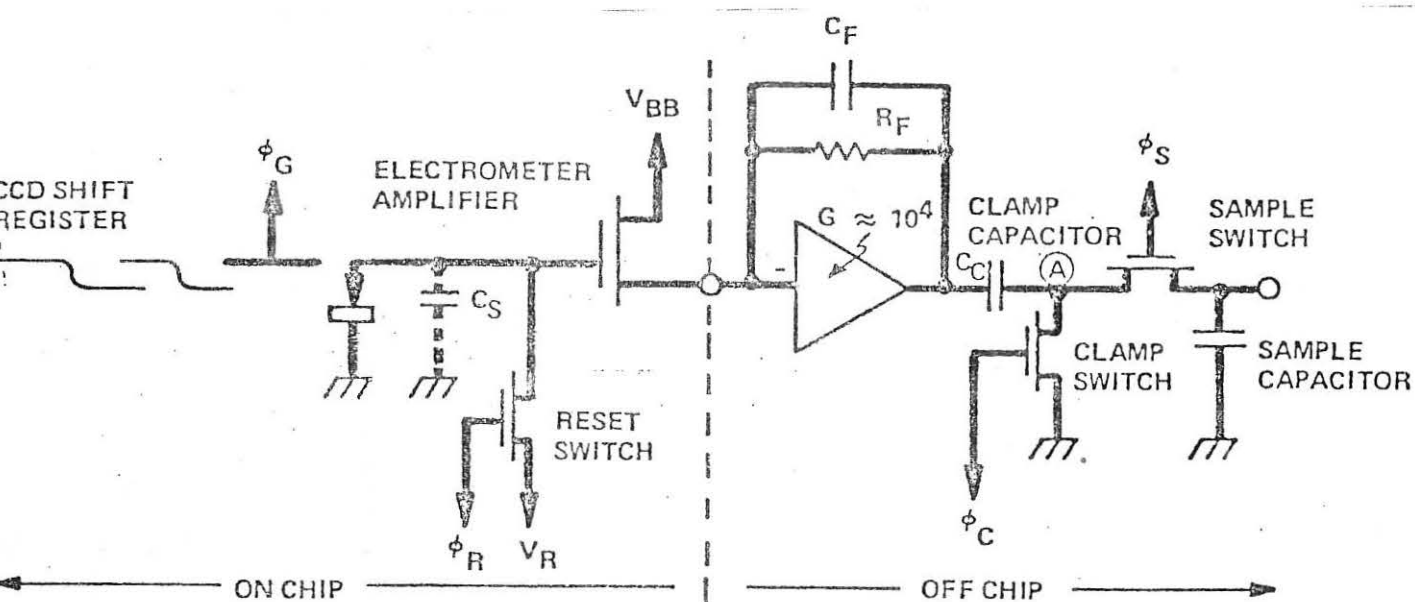


Fig. 4 c Aufbau eines CID-Steuersystems



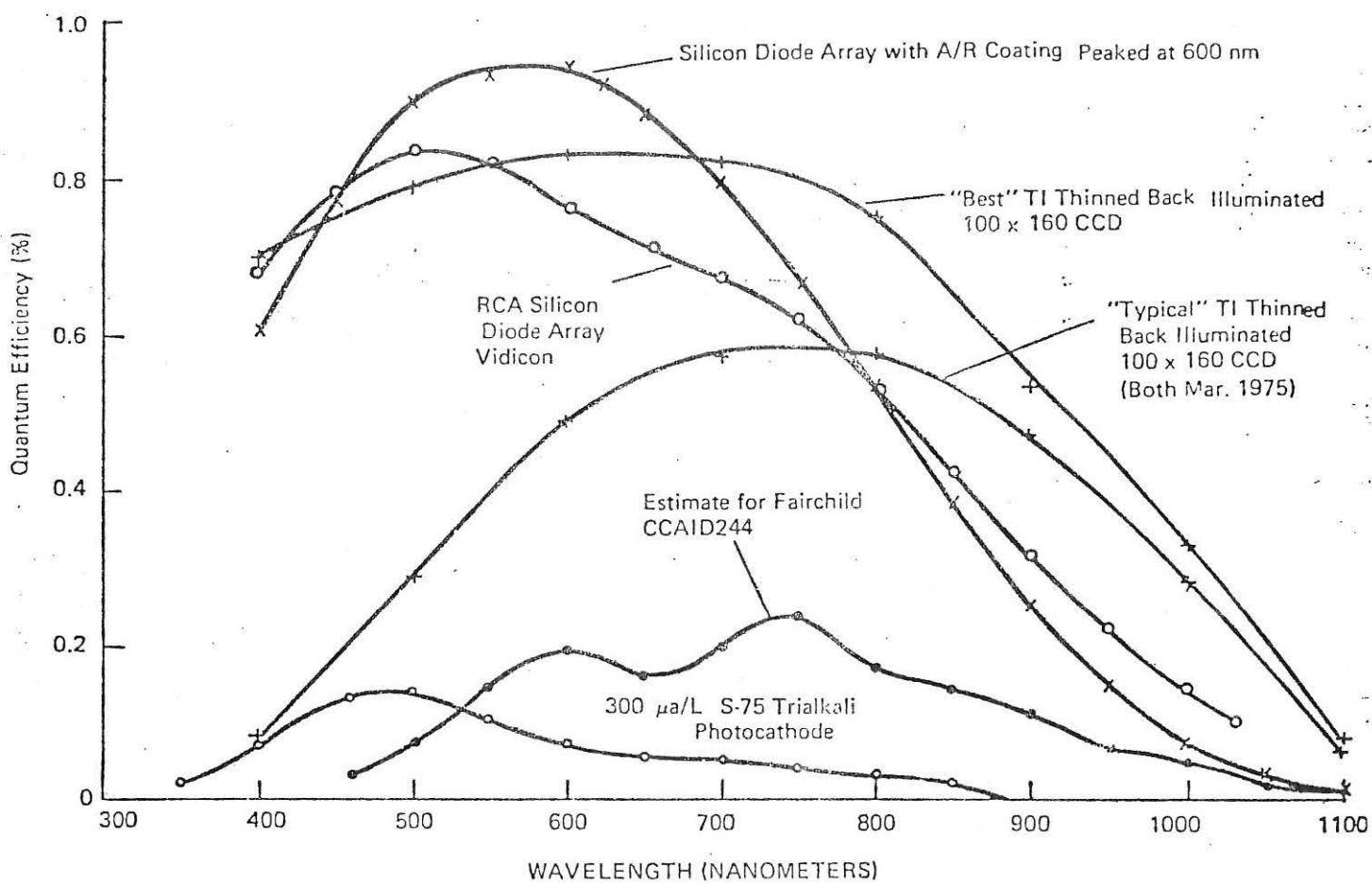
Reset switch replaces load resistor for CCD. Correlated double sampling shown removes most of reset switch Johnson noise, leaving CCD noise, electrometer amplifier noise, and off-chip amplifier noise. C_S is still a performance determining factor.

C.D.S. Operations:

1. Reset diode node to $V_R \pm \sqrt{kTC_S}$
2. Close clamp switch so negative of reset noise sample appears across C_C . Open clamp switch.
3. Transfer next signal charge packet to gated collection diode.
4. Signal at (A) is $f[(q_s + q_n) - q_n] = f(q_s)$ alone. Operate sample switch to present corresponding signal at output.

Correlated Double Sampling Removes Reset Noise at CCD Output.

Fig. 5 Schaltung zur Reduzierung des Rauschens innerhalb und außerhalb des CCD's



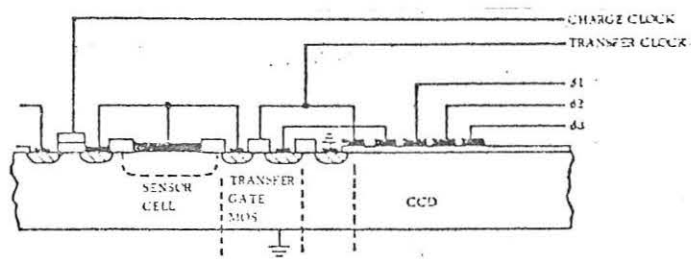
Quantum Efficiency vs Wavelength for Solid-State and Electron Beam Scanned Sensors.

Fig. 6 Wirkungsgrade (Empfindlichkeiten) von Bildröhren und CCD-Detektoren (1977)

Camera Tubes	CCD Imagers
More total resolvable elements/frame	Higher SNR at maximum signal
Better small scale response uniformity	Large effective dynamic range (except for blemishes)
Large single terminal output data rate	Lower system noise
Lower blooming	Freedom from lag at all light levels
Larger Image Size	Geometric Fidelity
High device image quality	Metricity
	Compactness
	Long stable life
	Low voltages
	TDI mode available

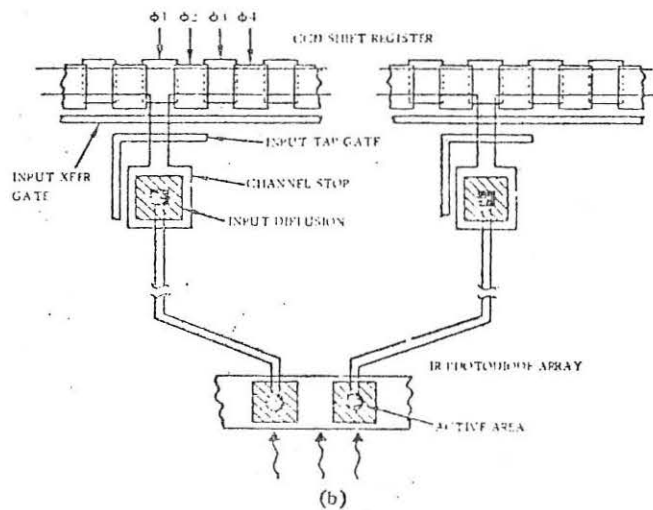
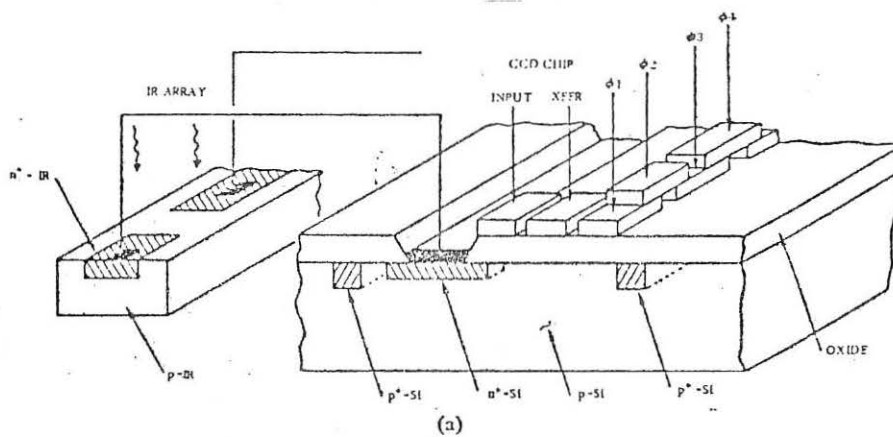
Summary Comparison Table.

Fig. 7 Vergleichstabelle Bildröhre/CCD-Detektor



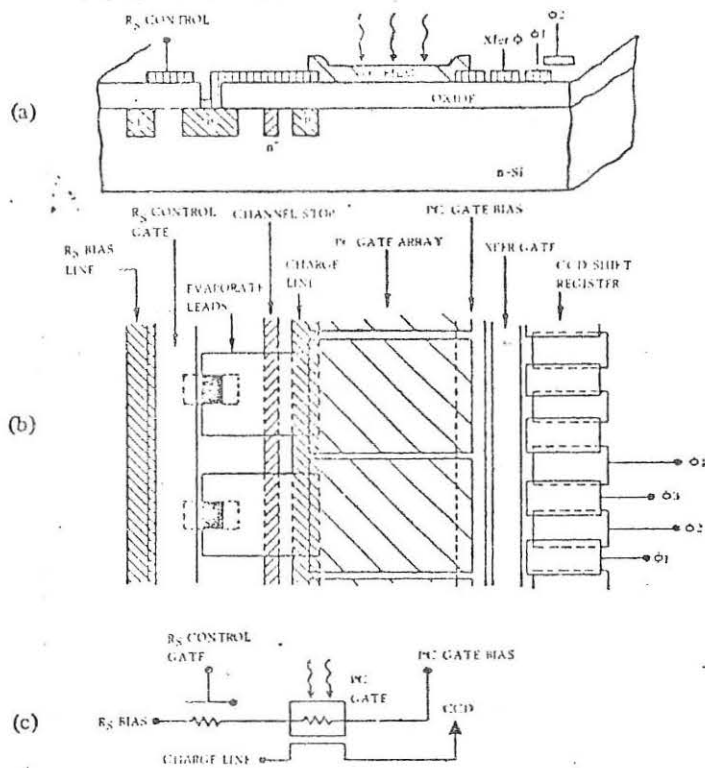
Schottky-barrier IRCCD proposed by Sheperd and Yang

Fig. 8 a Aufbau eines IRCCD



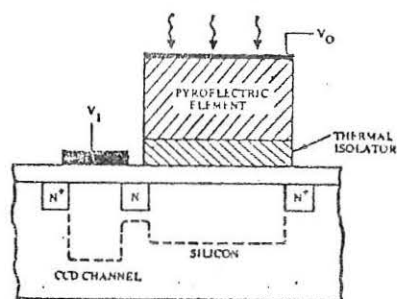
Direct injection hybrid IRCCD. (a) Coupling concept. (b) Array layout.

Fig. 8 b Auslegung eines IRCCD



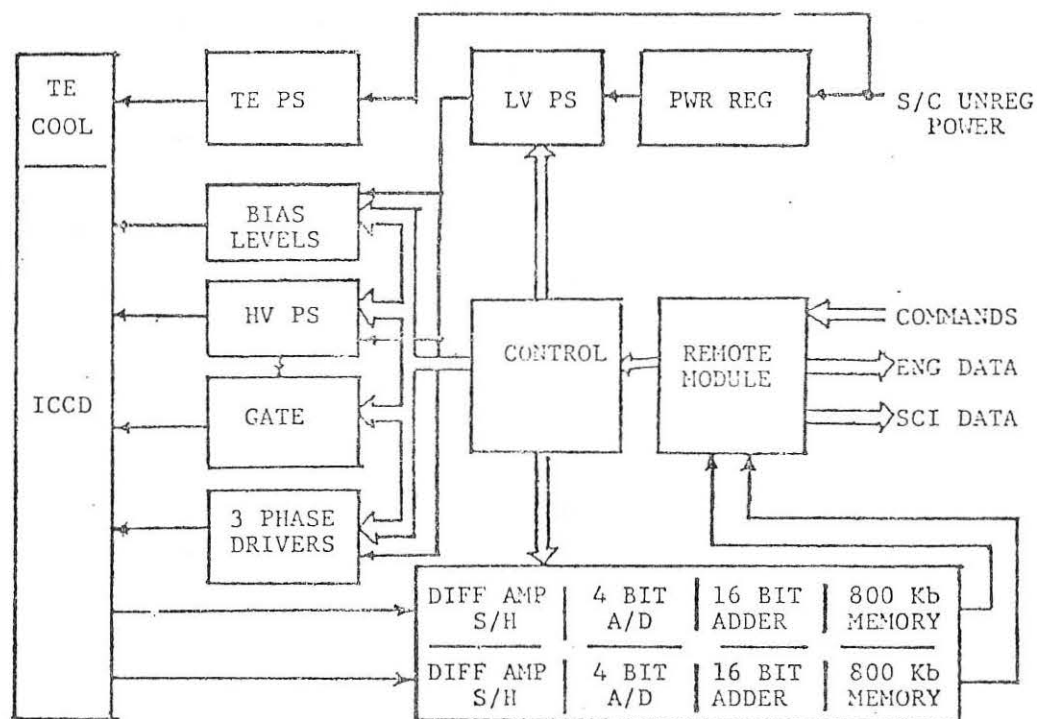
Indirect injection: photoconductive thin-film hybrid IRCCD.
(a) Device cross section. (b) Two-dimensional layout. (c) Equivalent circuit.

Fig. 8 c Indirektes Auffassen der Strahlung IRCCD



Indirect injection: pyroelectric hybrid IRCCD.

Fig. 8 d Indirektes Auffassen der Strahlung über pyroel. Element

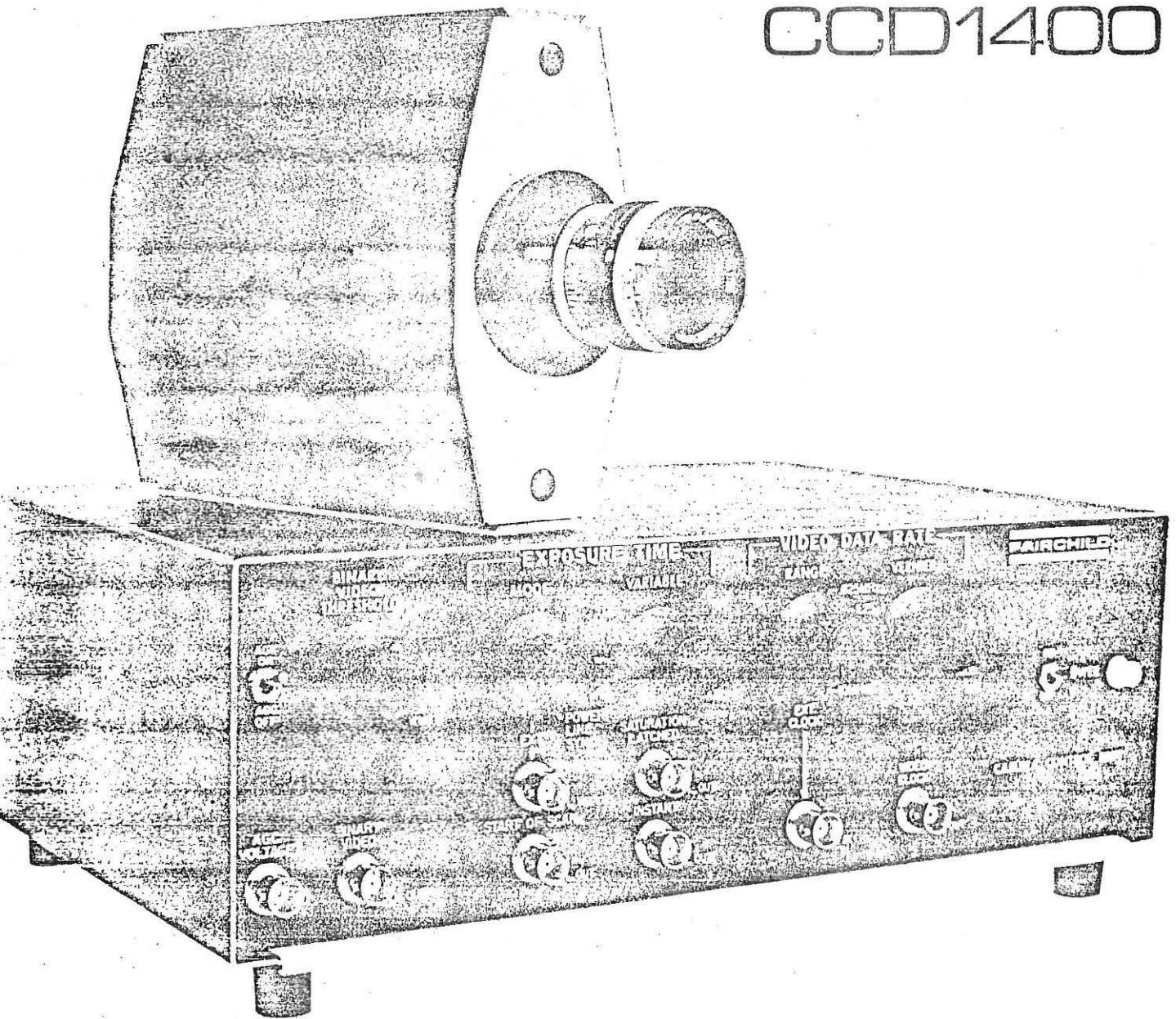


Digital Camera System

Fig. 9 Schema eines digitalen Kamera-Systems mit Intensified CCD-Bildaufnahme

CCD LINE-SCAN CAMERAS

MODELS
CCD1100
CCD1300
CCD1400

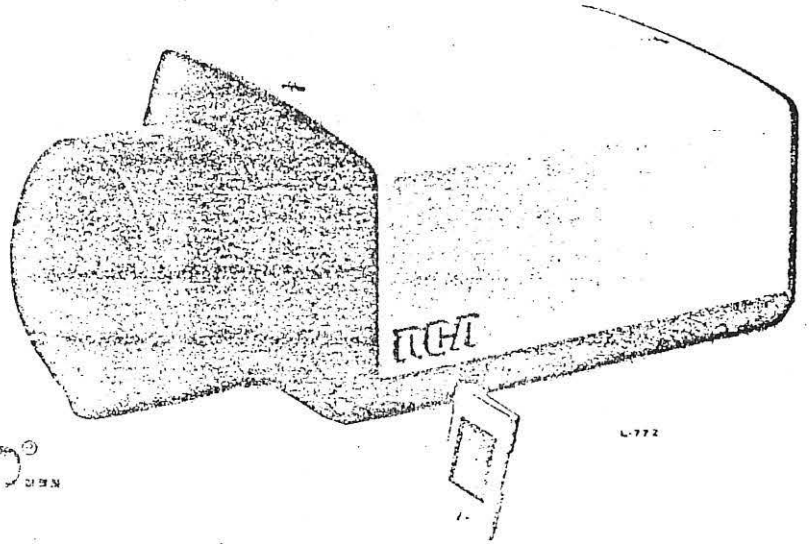


JANUARY 1978

FAIRCHILD

Fig. 10 Fairchild CCD Line-Scan Kamera

closed-circuit video equipment Camera



Uses RCA's big
Silicon Imaging Device
SID52501

Charge Coupled Device Camera

An everyday, working camera . . . completely solid-state. . . with truly useful resolution. Uses interchangeable "C"-mount lenses for high sensitivity and precision image geometry.

Sharp, Snappy Pictures

163,840 picture elements in RCA's big SID give high-quality 3-MHz-bandwidth pictures. Big SID is the first CCD able to produce full 525-line standard TV pictures.

Solid-State Reliability

No vidicon to replace—No field adjustments.

Unique Performance Features

Anti-blooming Big SID ensures sharp, clear highlights. No lag or image retention. High Sensitivity comparable to cameras with silicon-target vidicons . . . useful pictures in scene light as low as 0.1 footcandle. Responds to infrared as well as visible light.

Low Image Distortion

Stable and linear picture permits high resolution, non-contact measurement within the viewing area for inspection, process control, pattern recognition, or scientific instrumentation.

Other Features . . .

Broadcast-compatible sync. White clipper. Black clamp. Gamma correction. Horizontal contour enhancement. Sturdy die-cast and extruded metal structure — fully shielded for safety and low rf pickup.

RCA Closed-Circuit
Video Equipment

Fig. 11 RCA CCD Array-Kamera

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM TC1160

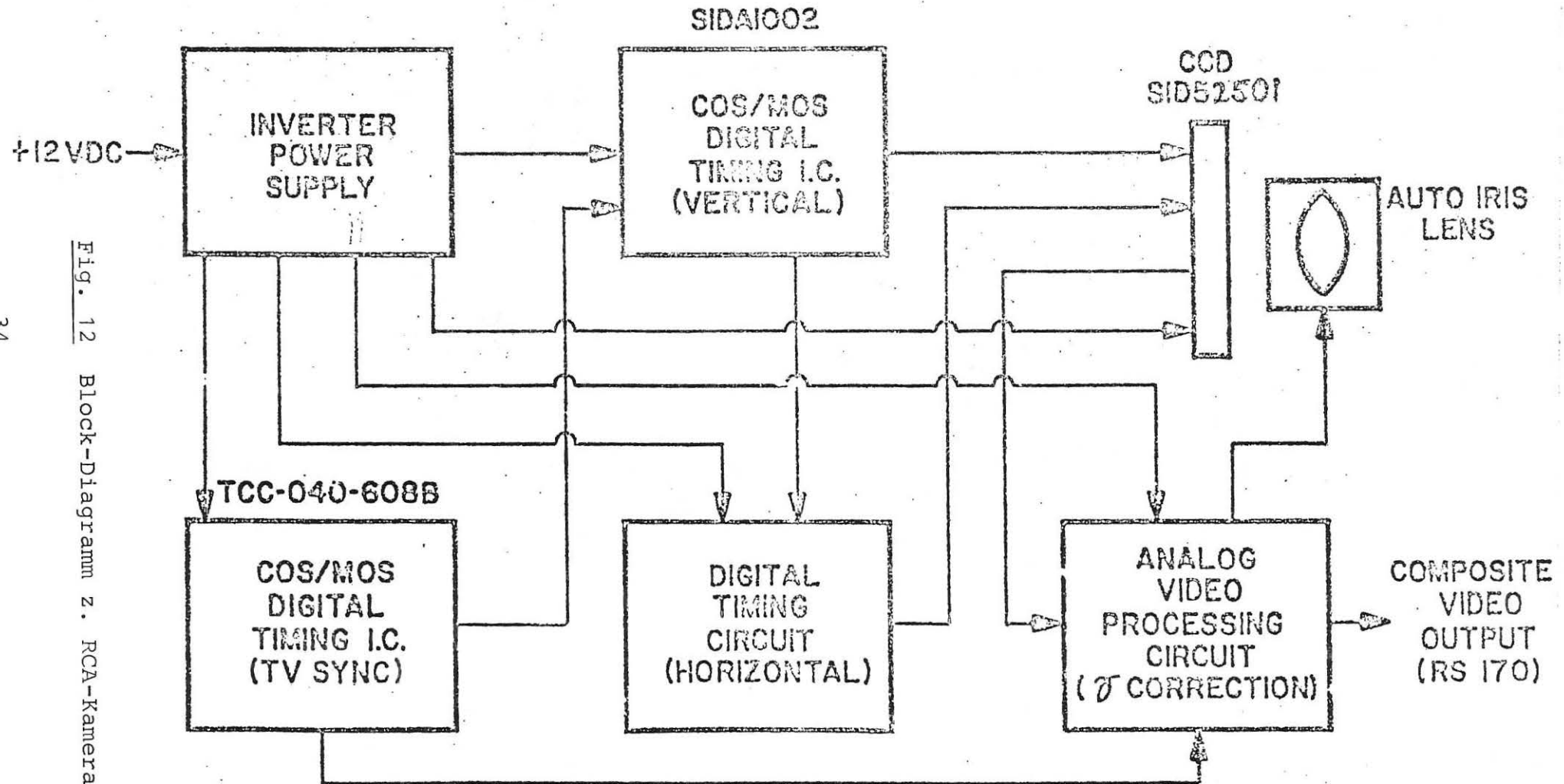


Fig. 12 Block-Diagramm z. RCA-Kamera

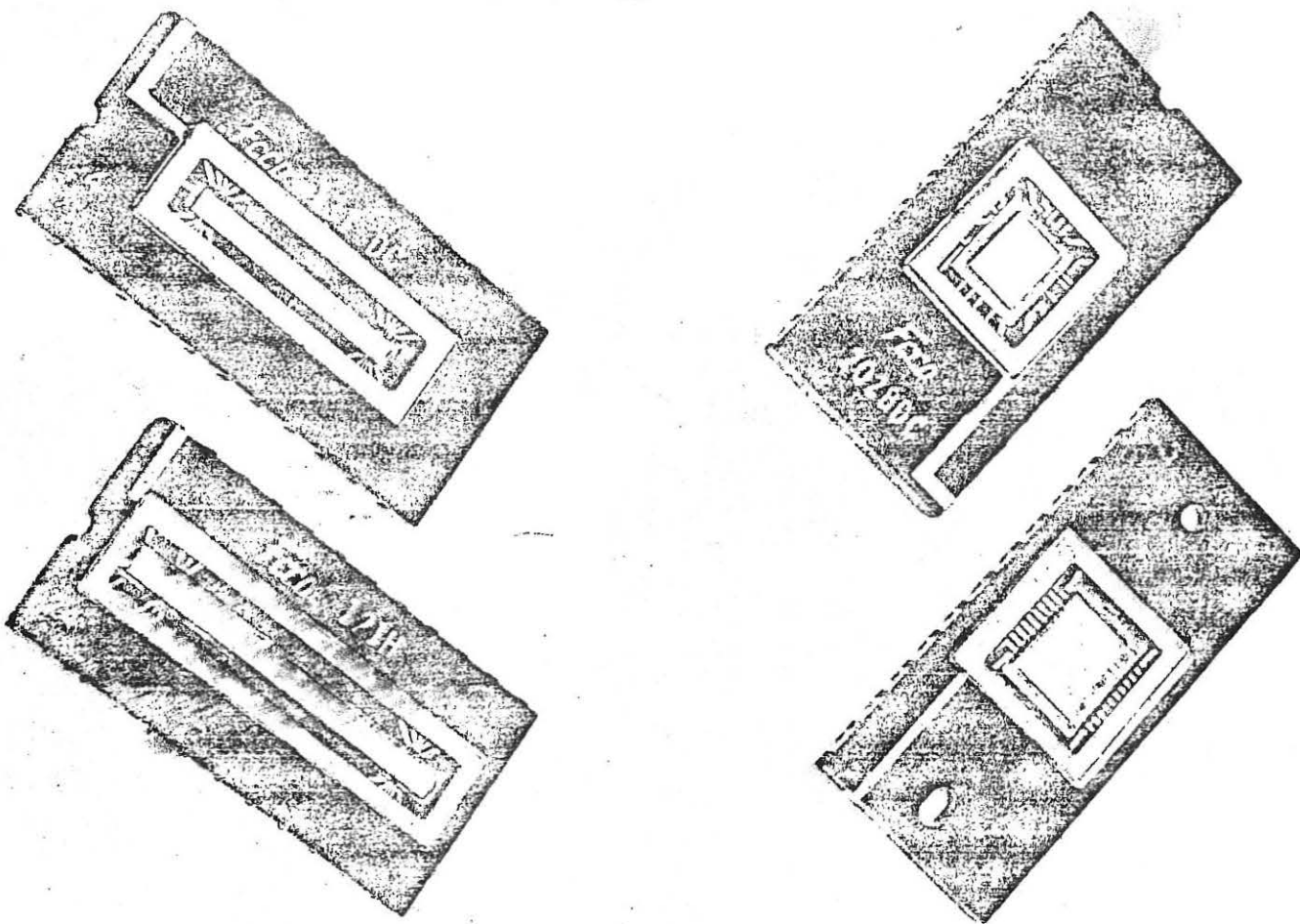


Fig. 13 CCD-Reihen- und Flächen-Detektoren